

Vakuová technika

Získávání a měření vakua, využití vakuových technologií

učební text

Katedra obecné a anorganické chemie

Fakulta chemicko-technologická

Univerzita Pardubice

2008

Ing. Milan Erben, Ph.D.

Předmluva

Vakuová zařízení jsou v současné době využívána v celé řadě technologických aplikací, v potravinářském průmyslu i při výzkumu. Zdroje vakua jsou naprosto nezbytné například pro nanášení či napařování tenkých vrstev na nejrůznější substráty (polovodiče, reflexní vrstvy na sklo, výroba speciálních zrcadel, tvorba vysoce odolných vrstev na řezné nástroje, pokovování plastů, aj.). Vakuové pece jsou používány při výrobě a výzkumu nových materiálů s komerčně zajímavými vlastnostmi, pro odstranění materiálového pnutí po tvářecích procesech, pro kapilární pájení nebo odplynění povrchu materiálů. Zcela běžně jsou v provozech zavedeny vakuové destilace nebo filtrace a stejně tak se moderní strojírenské provozy neobejdou bez automatických montážních linek, kde jsou jako uchopovací prvky využívány podtlakové přísavky.

Proto byl sestaven tento text, který je věnovaný popisu a objasnění stávajících vakuových technologií. V úvodu je čtenář krátce seznámen se základními fyzikálními veličinami, které popisují vakuum a vakuové procesy. Následuje část věnovaná zdrojům vakua, kde jsou popsány principy jednotlivých zařízení spolu s jejich stručnou charakterizací. Třetí část textu se zabývá měřením nízkých tlaků a přístrojům, které tato měření umožňují. V závěru je uveden výčet průmyslových odvětví a technologických operací, ve kterých je využíváno vakuové techniky.

Autor předpokládá, že tento text pomůže studentům a absolventům vysokých škol technického zaměření lépe se orientovat ve vakuových technologiích. Pochopení principů vytváření a měření vakua, spolu se získáním přehledu o aplikaci vakuových zařízení v technologických procesech je pro studenty – budoucí technology – významným přínosem a zvyšuje jejich šanci při uplatnění v průmyslu.

Tento studijní materiál vznikl jako součást řešení grantu

MŠMT ČR FRVŠ/2098/2008/F1a.

1. Základní pojmy

1.1 Jednotky tlaku a jejich převod

Základní SI jednotkou tlaku je pascal, kde

$$\text{Pa} = \text{N} \cdot \text{m}^{-2} = \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}.$$

Existuje celá řada dalších jednotek, kterými lze hodnotu tlaku vyjádřit. Některé jsou již zastaralé, ale je možné se s nimi stále setkat v odborné či starší technické literatuře. Jiné jsou naopak velmi často používány v anglosaské, či americké literatuře. Následující tabulka uvádí hodnoty přepočítávacích koeficientů, které je potřeba použít při o převodu na jiné jednotky tlaku.

Tabulka 1: Konverze různých jednotek tlaku

	Pa	torr	atm	bar	psi	psf	kp.cm ⁻²
Pa	1	7,5006.10 ⁻³	9,8692.10 ⁻⁶	1.10 ⁻⁶	1,4504.10 ⁻⁴	2,0885.10 ⁻²	1,0197.10 ⁻⁵
torr	133,322	1	1,3158.10 ⁻³	1,3332.10 ⁻³	1,9337.10 ⁻²	2,7844	1,3594.10 ⁻³
atm	1,01325.10 ⁵	760	1	1,01325	14,69595	2116,22	1,033227
bar	1.10 ⁵	750,06	0,98692	1	14,5038	2088,5	1,0197
psi	6894,76	51,715	0,068046	0,068948	1	144,00	0,070306
psf	47,88	0,35913	4,7254.10 ⁻⁴	4,788.10 ⁻⁴	6,9444.10 ⁻³	1	4,882.10 ⁻⁴
kp.cm ⁻²	98067	735,58	0,9678	0,98067	14,223	2048,3	1

Vysvětlivky: **torr** je hydrostatický tlak 1 mm Hg sloupce na hladině moře při 0°C; **atm** je fyzikální atmosféra a vychází ze standardního tlaku atmosférického vzduchu; **psi** (z angl. „pound per square inch“) libra na čtvereční palec odpovídá tlaku g.lb.in⁻² na hladině moře; **psf** (z angl. „pound per square foot“) libra na čtvereční stopu odpovídá tlaku g.lb.ft⁻² na hladině moře; **kp.cm⁻²** je kilopond na centimetr čtvereční, tzv. technická atmosféra (**at**) a odpovídá tlaku g.kg.cm⁻² na hladině moře.

1.2 Definice tlaku

V *mechanice* je tlak definován jako jednotka síly působící kolmo na jednotku plochy:

$$p = \frac{dF}{dS}$$

Síla F i plocha S jsou vektory, tlak je skalární veličina. Tlak se v tekutině v klidu šíří všemi směry stejně.

V *hydromechanice* tlak představuje tíhu sloupce tekutiny:

$$dp = d(hg\rho)$$

přičemž jak hustota ρ , tak gravitační zrychlení g mohou záviset na výšce sloupce h a při integraci je nutno tento fakt zohlednit. Pro nepřilíš velké hodnoty výšky h je možno gravitační konstantu považovat za konstantní a u málo stlačitelných tekutin je konstantní i hustota ρ . Rozdíl tlaků mezi dvěma výškami se pak redukuje na jednodušší vztah

$$p_1 - p_2 = (h_1 - h_2)g\rho$$

V *kinetické teorii plynů* je tlak dán kinetickou energií molekul v daném objemu, vyjádřenou počtem srážek molekul plynu se stěnami nádoby:

$$p = \frac{z\sqrt{2\pi MRT}}{S\tau N_A}$$

kde z je počet nárazů molekul plynu na stěnu o ploše S za čas τ , N_A je Avogadrova konstanta, MRT je součin molární hmotnosti plynu, univerzální plynové konstanty a teploty.

Tyto tři uvedené definice zahrnují i většinu způsobů měření tlaku, jak bude ukázáno dále.

1.3 Klasifikace tlaků

Z praktických důvodů je užitečné uvést hrubou klasifikaci tlaků podle hodnot. Tato klasifikace umožňuje rychlejší orientaci v dostupnosti a použitelnosti technologických postupů při generování a měření tlaku. Uvedené rozsahy mají pouze informační charakter.

- 1) dokonalé vakuum 0 Pa (absolutně prázdný prostor, je to spíše hypotetická situace)
- 2) extrémně vysoké vakuum $< 10^{-10}$ Pa
- 3) ultravysoké vakuum $10^{-10} - 10^{-7}$ Pa
- 4) vysoké vakuum $10^{-7} - 10^{-2}$ Pa
- 5) nízké vakuum $10^{-1} - 10^2$ Pa
- 6) atmosférický tlak (pouze pro tlak okolního vzduchu) $101,25 \cdot 10^3$ Pa
- 7) zvýšený tlak, do $\sim 3 \cdot 10^6$ Pa
- 8) vysoký tlak, do $\sim 4 \cdot 10^7$ Pa
- 9) velmi vysoký tlak, do $\sim 5 \cdot 10^8$ Pa
- 10) ultravysoký tlak, nad $\sim 5 \cdot 10^8$ Pa

Pro zajímavost lze uvést, že nejvyšší dosažené vakuum v pozemské laboratoři se blížilo hodnotě 10^{-11} Pa, vakuum ve vesmírném prostoru dosahuje hodnot 10^{-15} Pa i méně – zde je nutné vzít v úvahu počet částic, které se nacházejí v určitém objemu. Tlak na povrchu Měsíce, který nemá vlastní atmosféru, avšak je neustále bombardován částicemi obsaženými v tzv. „slunečním větru“, je cca 10^{-9} Pa což představuje počet $4 \cdot 10^5$ částic v 1 cm^3 objemu. V meziplanetárním prostoru se nachází přibližně 10 částic, v mezihvězdném prostoru 1 částice a v mezegalaktickém prostoru dokonce 10^{-6} částic v 1 cm^3 objemu. Tlak se zde tedy limitně blíží dokonalému vakuu.

Naopak nejvyšší uměle dosažený tlak statickou metodou, tj. dlouhodobým silovým působením na vzorek, se blížil hodnotě $5 \cdot 10^9$ Pa. Dynamickými metodami založenými na působení rázové vlny při výbuchu lze dosahovat tlaků řádově ještě vyšších, ovšem jen po velmi krátkou dobu.

1.4 Vakuum - všeobecné pojmy

Vakuum je ve fyzice a technice označení pro prostor, v němž je tlak plynu výrazně nižší než normální atmosférický tlak okolí. Přesnější definice užívaná zejména v teoretické fyzice zní: „Vakuum je stav systému s nejnižší možnou energií.“ Je to tedy prostor tak prázdný, jak je to jen možné. K vymezení vakua se používají obvyklé jednotky tlaku. Absolutnímu vakuu, které vyhovuje teoretické definici, by odpovídala nulová hodnota.

V ideálním případě označuje vakuum takový fyzikální stav, v němž není přítomná žádná částice, a to jak hmoty (např. molekuly, částice, apod.), tak ani záření (např. fotony). Jedná se tedy o část prostoru, která neobsahuje hmotu, ale může obsahovat pole (gravitační, magnetické aj.). Takové vakuum bývá označováno jako dokonalé. O vakuu neobsahujícím pole se mluví jako o prázdném prostoru.

Vakuum ve skutečnosti není prázdné. Podle kvantové teorie pole v něm neustále vznikají a zanikají páry částic a antičástic. Teoreticky určená hustota jeho energie je obrovská. Vakuum lze (alespoň teoreticky) zavést i v klasické fyzice, avšak podle kvantové teorie ani prostor bez jakékoliv hmoty není úplně prázdný, ale probíhá tam mnoho procesů (kvantově-mechanické fluktuace, tvorba párů částic a antičástic a jejich opětovný zánik apod.). Občas se hovoří o tzv. energii vakua. Tyto kvantové jevy souvisí s principem neurčitosti. Pro praktické a inženýrsko-technologické aplikace je vakuum prostor s tlakem nižším než tlak atmosférický (okolní).

Střední volná dráha molekul je průměrná vzdálenost, kterou molekula urazí v prostoru aniž se srazí s jinou molekulou:

$$\lambda = \frac{RT}{p\sqrt{2}\pi\sigma^2 N_A}$$

Tzv. kolizní průměr molekuly σ pro některé plyny (v nm): H₂ – 0,275; He – 0,225; N₂ – 0,38; O₂ – 0,365; vzduch – 0,375; H₂O(g) – 0,47; CO₂ – 0,465; Ar – 0,36.

K tomu, aby molekula mohla systém opustit nějakým otvorem, je nutné, aby její střední volná dráha byla menší než rozměry otvoru. Zde je nutné zdůraznit význam této veličiny pro konstrukci vakuových zařízení. Při teplotě 300 K a tlaku 10⁻¹ Pa je střední volná dráha molekul vzduchu 6 cm, při tlaku 10⁻³ Pa se zvětšuje na 6 m a při tlaku, který panuje na povrchu Měsíce (10⁻⁹ Pa) je střední volná dráha 6000 km. Tím lze vysvětlit nutnost použití rozměrných aparatur při práci za nízkých tlaků.

Střední rychlost pohybu molekul je dána vztahem:

$$v = \sqrt{\frac{8kN_A T}{\pi M}}$$

Schopnost proudění plynu částmi vakuových systémů (otvory, spojovací potrubí) charakterizuje tzv. *vakuová vodivost* G. Například vakuová vodivost otvoru o ploše S₀ ve stěně o ploše S je dána vztahem:

$$G = \frac{vS_o}{4(1 - \frac{S_o}{S})}$$

Dosadíme-li rychlost v m.s⁻¹ a plochu v m², jednotka vakuové vodivosti bude m³.s⁻¹ – tedy objem plynu, který projde otvorem za jednotku času. Pro *vakuovou vodivost válcového potrubí* o průměru d a délce l lze odvodit:

$$G = \frac{3,81 d^3}{l} \sqrt{\frac{T}{M}}$$

Při těchto výpočtech je nutné brát v úvahu charakter proudění plynu v systému, tj. jedná-li se o viskózní tok plynu ($\lambda < d/200$, molekuly plynu mění směr pohybu z důvodu srážek mezi sebou) či molekulární tok ($\lambda \geq d$, molekuly mění směr pohybu z důvodu srážek s se stěnou potrubí). V případě, že čerpaný plyn bude vzduch při laboratorní teplotě ($M = 28,96 \text{ g.mol}^{-1}$, $T = 298 \text{ K}$), lze vakuovou vodivost potrubí odhadnout dle následujících vzorců. Rozměry potrubí d a l zde dosazujeme v cm a vakuovou vodivost G vypočteme v l.s⁻¹.

$$\text{pro viskózní tok: } G \approx 10 \frac{d^4}{l}$$

$$\text{pro molekulární tok: } G \approx 10 \frac{d^3}{l}$$

2. Získávání vakua

Prostředkem k získávání vakua je vývěva, kterou lze v zásadě považovat za otvor o ploše S do prostoru s nižším tlakem. Připojíme-li nějaký systém s tlakem p_1 k jinému systému, kde je vakuum charakterizované tlakem p_2 , začnou otvorem mezi oběma systémy proudit molekuly oběma směry. Počet molekul vytékajících ze systému do vývěvy je dán rozdílem $N_1 - N_2$.

$$N_1 - N_2 = S(p_1 - p_2) \sqrt{\frac{N_A}{2\pi kMT}}$$

Další veličinou charakterizující vývěvu je *čerpací rychlost* S_p (v l.s⁻¹), která je vyjádřena následující rovnicí.

$$S_p = 3,64S(p_1 - p_2) \sqrt{\frac{T}{M}}$$

Čerpací rychlost je tedy funkcí tlaku v systému (tzv. čerpací charakteristika) a p_2 je tzv. *mezní, tedy nejnižší tlak*, kterého je vývěva schopna dosáhnout. Kvalitní a účinná vývěva tedy musí mít velký vstupní otvor a nízký mezní tlak.

Stav systému je popsán stavovou rovnicí, která je vztahem mezi teplotu T , tlakem p , objemem V a látkovým množstvím n . Obecně platné termodynamické principy lze zapsat v diferenciálním tvaru.

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_{V,n} > 0 \quad \left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_{T,n} \leq 0 \quad \left(\frac{\partial p}{\partial n}\right)_{T,p} \geq 0$$

Z uvedených rovnic plyne, že tlak systému může být snížen jedním nebo kombinací několika z následujících postupů:

1. snížením teploty systému při konstantním objemu systému a konstantním látkovém množství v něm,
2. zvýšením objemu systému při konstantní teplotě a konstantním počtu molů
3. snížením látkového množství v systému za konstantní teploty a objemu.

Tyto tři postupy mohou být kombinovány (postupně) nebo použity současně. Zároveň je možné postupy obrátit k dosažení opačného efektu, tj. ke zvýšení tlaku systému.

2.1 Typy vývěv

Vývěvy lze rozlišit podle způsobu jakým dosahují snížení tlaku na vývěvy transportní a adsorpční. Transportní vývěvy odčerpávají z evakuovaného prostoru molekuly plynu, které procházejí vývěvou, zatímco vývěvy adsorpční tyto molekuly zachycují uvnitř vývěvy. Už jen z tohoto základního rozdělení je patrné, že vývěvy transportní mohou pracovat kontinuálně na rozdíl od vývěv adsorpčních, které obvykle pracují v cyklech. Transportní vývěvy se dále dělí na mechanické a hybnostní. Mechanické vývěvy dosahují snižování tlaku cyklickou změnou objemu ve vývěvě, hybnostní vývěvy předávají molekulám čerpaného plynu rychlostní impuls ve směru čerpání plynu.

Tabulka 2: Rozdělení vývěv podle způsobu jakým snižují tlak.

vývěvy	adsorpční	kryokondenzační, kryosorpční, getrová		
	transportní	mechanické	pístové	membránová, Sprenglerova, Toeplerova
			rotační	rotační olejová, rotační rtuťová, Rootsova
		hybnostní	vodní, difúzní, molekulární, iontová	

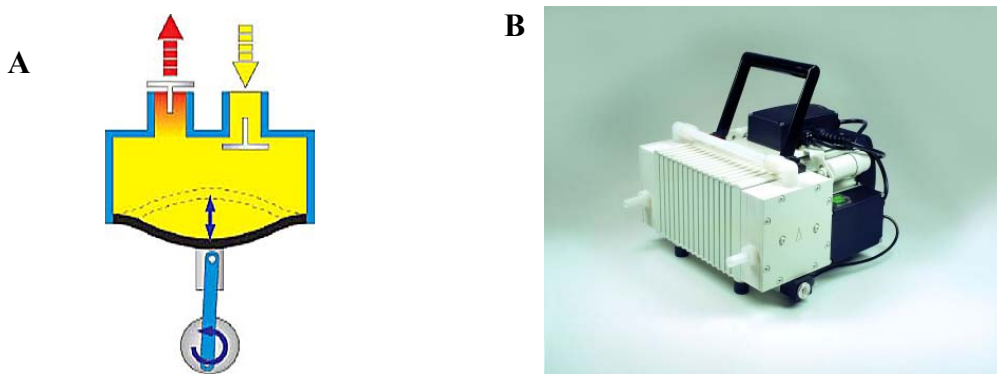
2.2 Vývěvy mechanické

Vývěvy pístové

Mechanická pístová vývěva pracuje na principu cyklického zvětšování objemu pohybem pístu v těsném válci (Sprenglerova vývěva). Píst může být tvořen i rtuťovým sloupcem jako například ve vývěvě Toeplerově. Pístové vývěvy s touto konstrukcí mají malou účinnost, pro svůj relativně velký mrtvý (nevyčerpatelný) objem a v současnosti se téměř nepoužívají.

Moderní variantou pístové vývěvy je vývěva membránová, která je dosti rozšířená v laboratořích a provozech kde je třeba dosahovat nízkého vakua, řádově 10^2 Pa. Mezní tlak je limitován tlakem při jakém ještě dojde k otevření vstupního ventilu do vývěvy. Často bývají tyto vývěvy používány jako jednotky pro vytvoření předvakua v hybridních vakuových jednotkách (např. spojení membránové a Rootsovy vývěvy). V případě že je jako píst použita membrána z chemicky inertního materiálu (Teflon), jsou tyto vývěvy vhodné i pro čerpání agresivních či korozivních plynů. Schéma membránové vývěvy je znázorněno na obrázku 1A. Tyto vývěvy mohou být zapojovány sériově (pro dosažení nižšího mezního tlaku) či paralelně (pro zvýšení čerpací rychlosti). Nevýhodou je časté opotřebení vstupních a výstupních ventilů

vývěvy, jejichž kvalita provedení a těsnost jsou pro funkci vývěvy zcela klíčové. Výhodou je relativně nízká cena zařízení.



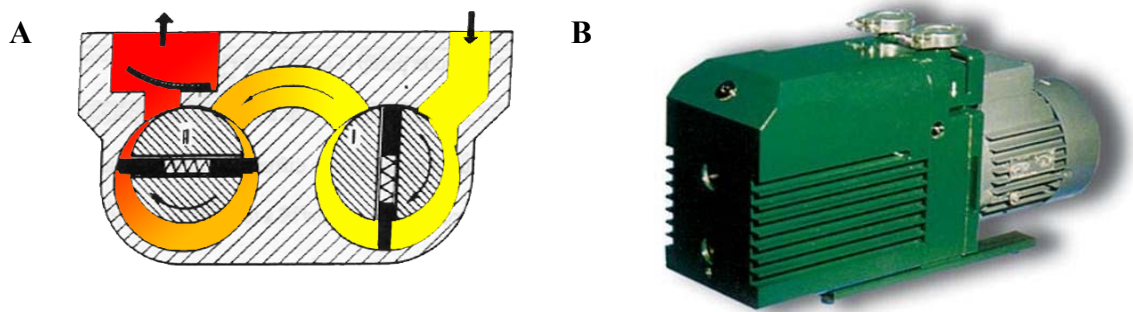
Obrázek 1. A: Schéma membránové vývěvy, **B:** fotografie dvoukomorové membránové vývěvy.

Vývěvy rotační

V laboratorní i technologické praxi jsou nejpoužívanější rotační olejové vývěvy. Ty pracují na základě excentricky uloženého rotoru s lopatkami. Olej zde hraje úlohu těsnící, slouží jako mazivo a do jisté míry i zajišťuje i přenos tepla uvolňovaného při stlačování plynu. Ve vývěvě dochází ke kompresi čerpaného plynu, což může mít za následek rozpouštění některých odčerpávaných látek (např. vodní páry) v oleji a jejich případný návrat do čerpaného systému. Kde je toto nežádoucí, používá se vývěv s proplachováním (tzv. gas-ballast), ovšem za cenu snížení účinnosti – mezního tlaku.

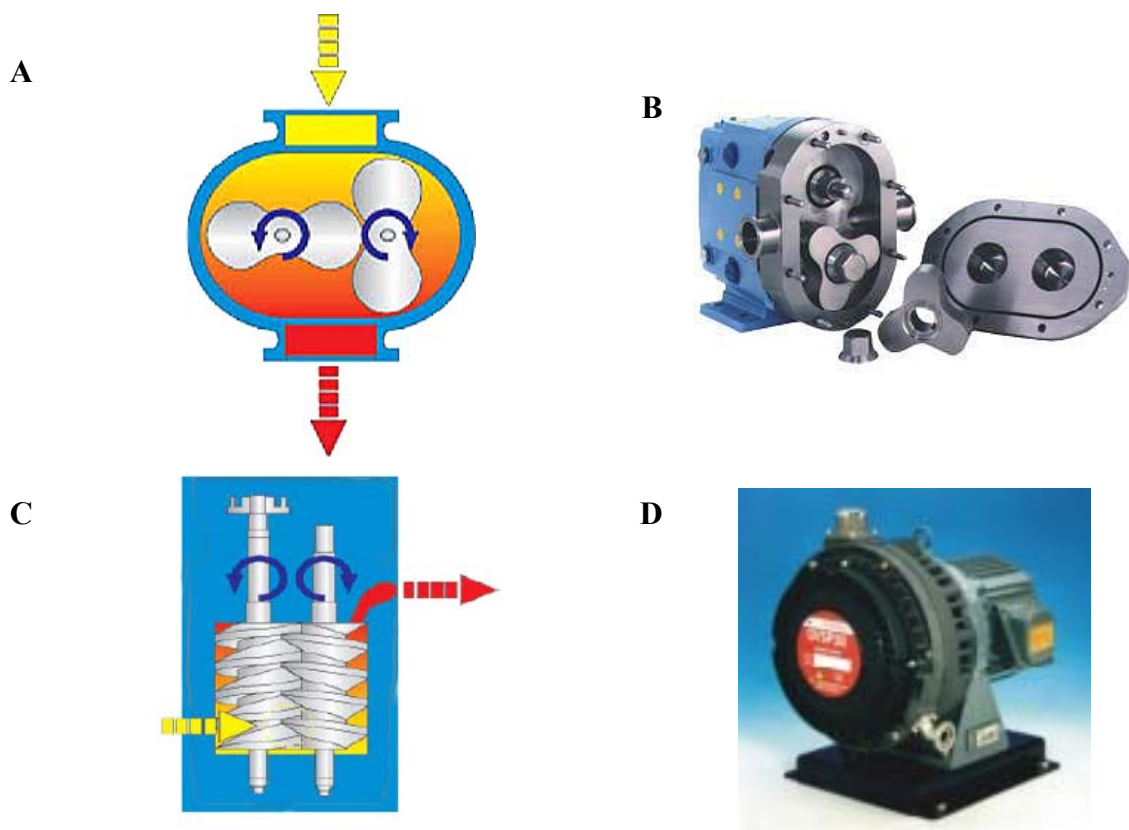
Mezní tlak běžných olejových rotačních vývěv se pohybuje v rozmezí 3 až 0.02 Pa (150 – 1 Pa u vývěv s proplachováním), maximální čerpací rychlost je v rozmezí jednotek až stovek litrů plynu za sekundu. K dosažení větší čerpací účinnosti bývají vývěvy spojeny paralelně či sériově. Některé rotační vývěvy jsou konstruovány jako dvojstupňové, což v podstatě představuje dvě vývěvy vzájemně sériově propojené a konstrukčně uspořádané v jednom bloku na společné hřídeli.

Účinnost olejové vývěvy ovlivňuje především kvalita použitého oleje, resp. tlak jeho nasycených par. Velkou nevýhodou olejových vývěv je možnost vniku oleje do čerpaného prostoru. Tyto nedostatky řeší rtuťové nebo suché vývěvy. Při použití těchto vývěv v laboratoři i v technologickém provozu je třeba zamezit vniknutí organických či korozivních látek do vývěvy, protože v takovém případě obvykle dochází k jejímu zadření, případně úplnému zničení. Stejně tak může nastat situace, kdy se páry oleje z vývěvy při nízkých tlacích dostávají do evakuovaného prostoru. Proto obvykle bývají pro laboratorní použití mezi vývěvu a evakuovaný prostor zařazeny tzv. vymrazovací prsty, kde dochází ke kondenzaci a zachycení par z vývěvy i z evakuovaného prostoru. Rotační olejové vývěvy musí vždy být uloženy tak, aby z nich nemohl vytékat pracovní olej.



Obrázek 2. A: Schéma dvoustupňové rotační olejové vývěvy, **B:** fotografie rotační olejové vývěvy.

Rootsovy vývěvy pracují na principu dmychadel nebo zubových čerpadel. Dva precizně vycentrované rotory s minimálními mezerami mezi sebou se otáčejí rychlostí několik tisíc otáček za minutu a přečerpávají plyn ze systému. Tyto velmi robustní vývěvy (nezřídka o váze i několika tun, často používané jako součást vzduchotechniky) vyžadují předvakuum (několik stovek Pa) a chlazení, mnohdy i odhlučnění. Jejich předností je velmi vysoká čerpací rychlost (až desítky tisíc l/min). Rotory mohou mít i tvar šroubovic či závitnic a stejně jako v předchozích případech mohou být tato zařízení sériově či paralelně zapojována. Protože tyto vývěvy neobsahují mazací oleje mohou být uloženy jakýmkoliv způsobem.

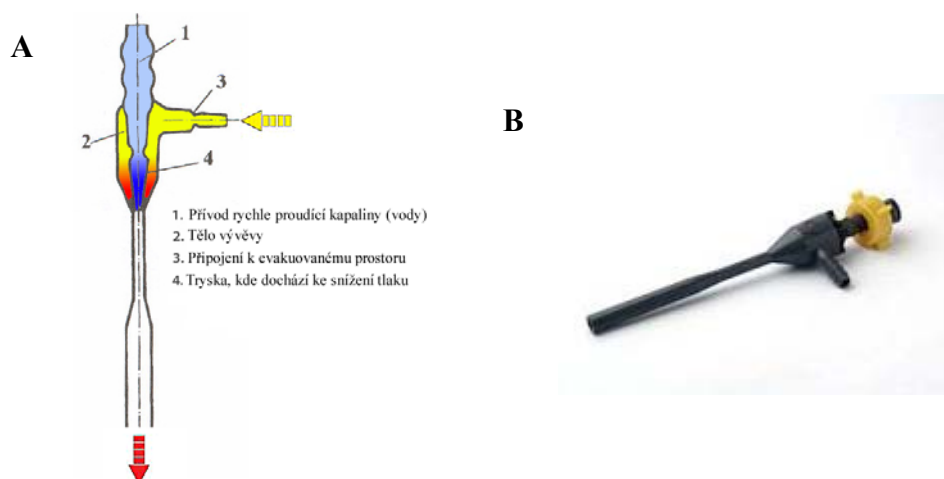


Obrázek 3. A: Schéma Rootsovy vývěvy, **B:** fotografie rozebrané Rootsovy (Lobeho) vývěvy, **C:** schéma vývěvy se šroubovicovými rotory, **D:** fotografie vývěvy se závitnicovým rotorem.

2.3 Vývěvy hybnostní

Kapalinová (vodní) vývěva

Vodní vývěva je reprezentantem skupiny vývěv s proudem pracovní tekutiny, kdy rychlý kuželový proud vody proudící z trysky strhává molekuly čerpaného plynu. Podle Bernoulliho rovnice je tlak v místě rychle proudící kapaliny nižší než v místě, kde kapalina proudí pomaleji, takže rozdíl tlaku nasává plyn z evakuovaného prostoru a směs kapaliny s plynem je odváděna z vývěvy. Fungování této vývěvy napomáhá i to, že proudící kapalina předává molekulám plynu hybnostní impuls ve směru čerpání plynu. Malá laboratorní vodní vývěva dosahuje čerpací rychlosti několik desetin litrů/min a mezního tlaku několika kPa. Dobře konstruované vodní vývěvy jsou schopné dosáhnout mezního tlaku, který je roven tenzi vodní páry při dané teplotě vody (např. 1,7 kPa při 15°C). Pro dosažení nižšího tlaku je třeba použít kapalinu s nižší tenzí par (obvykle silikonové oleje s nízkou viskozitou). Vývěva je levná a konstrukčně velmi jednoduchá (viz obr. 4), proto je rozšířená zejména v laboratořích, její nevýhodou je značná spotřeba vody.



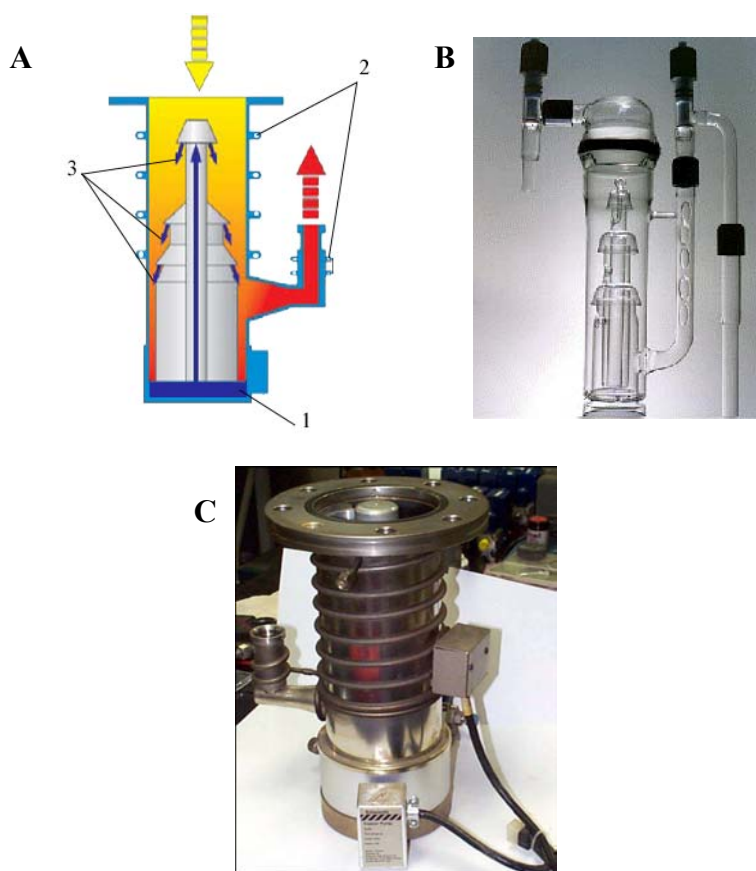
Obrázek 4. **A:** Schéma vodní vývěvy, **B:** fotografie plastové vodní vývěvy s převlečnou maticí pro připojení na vodovod.

Vývěva difúzní

V technice vysokého vakua se uplatňují velice často difúzní vývěvy. Ty vyžadují předvakuum v řádech jednotek až desítek Pa (tj. jejich výstup je připojen na vstup primární vývěvy, většinou rotační olejové). Difúzní vývěva nemá žádné pohyblivé části a funguje podobně jako kapalinová vývěva, v oblasti vyššího vakua však působí pouze strhávání molekul plynu rychle proudící kapalinou nebo parou. Dosažitelné vakuum je omezeno povrchovým napětím čerpací kapaliny nebo par, proto se dříve používala rtuť, dnes většinou olejové páry. Difúzní vývěva sestává z varné části (**1**, viz schéma 5A), kde se elektrickým proudem zahřívá k varu pracovní tekutina (olej nebo rtuť) a její páry jsou vedeny tryskou do prostoru vývěvy (**3**). Směr proudění těchto par je shodný se směrem proudění čerpaného plynu. Čerpaný plyn difunduje do par pracovní tekutiny a tato směs je pak vedena do prostoru, kde zkondenzuje pouze pracovní tekutina (a stéká zpět do varné části) a čerpaný plyn je odveden primární vývěvou ze systému. Pro správnou funkci je nutno plášť vývěvy, po jehož vnitřní straně stéká zkondenzovaná pracovní tekutina, účinně chladit, obvykle vodou (**2**). Mezní tlak olejových difúzních vývěv se pohybuje v rozmezí 10^{-2} až 10^{-7} Pa (závisí na kvalitě a typu oleje), u rtuťových vývěv je to přibližně 10^{-5} Pa. Vzhledem k velké jedovatosti

rtuti se dnes používají téměř výhradně olejové náplně, které jsou tvořeny silikonovými oleji či polyfenylethery s teplotou varu cca 180°C, při tlaku 10⁻³ Pa (např. Dow Corning 705, Santovac 5 aj.). Tyto oleje jsou chemicky i tepelně velmi stabilní a proto jsou používány v laboratořích i v technologických provozech. Čerpací rychlost difúzních vývěv je relativně nízká a pro dosažení mezního tlaku v evakuovaném prostoru je nutné odčerpávat plyn velmi dlouho (i desítky hodin). Čerpací rychlost je vyšší u difúzních vývěv s velkým průměrem těla vývěvy.

Výhodou těchto vývěv je relativně nízká cena, konstrukční jednoduchost, odolnost a v neposlední řadě i schopnost čerpat jakýkoliv plyn. Nevýhodou je možné znečištění vakua parami pracovní tekutiny a proto je nutné mezi evakuovaný prostor a difúzní vývěvu zařazovat vymrazovací prsty a lapače oleje. Mají také poměrně dlouhou dobu náběhu (před spuštěním je nutno zahřát náplň na pracovní teplotu cca 200°C) i dlouhou dobu odstavení. Musejí být vždy umístěny vertikálně a je nutno zamezit vniknutí vzduchu do vývěvy během čerpání, protože hrozí znehodnocení pracovní tekutiny účinkem kyslíku za vysoké teploty.

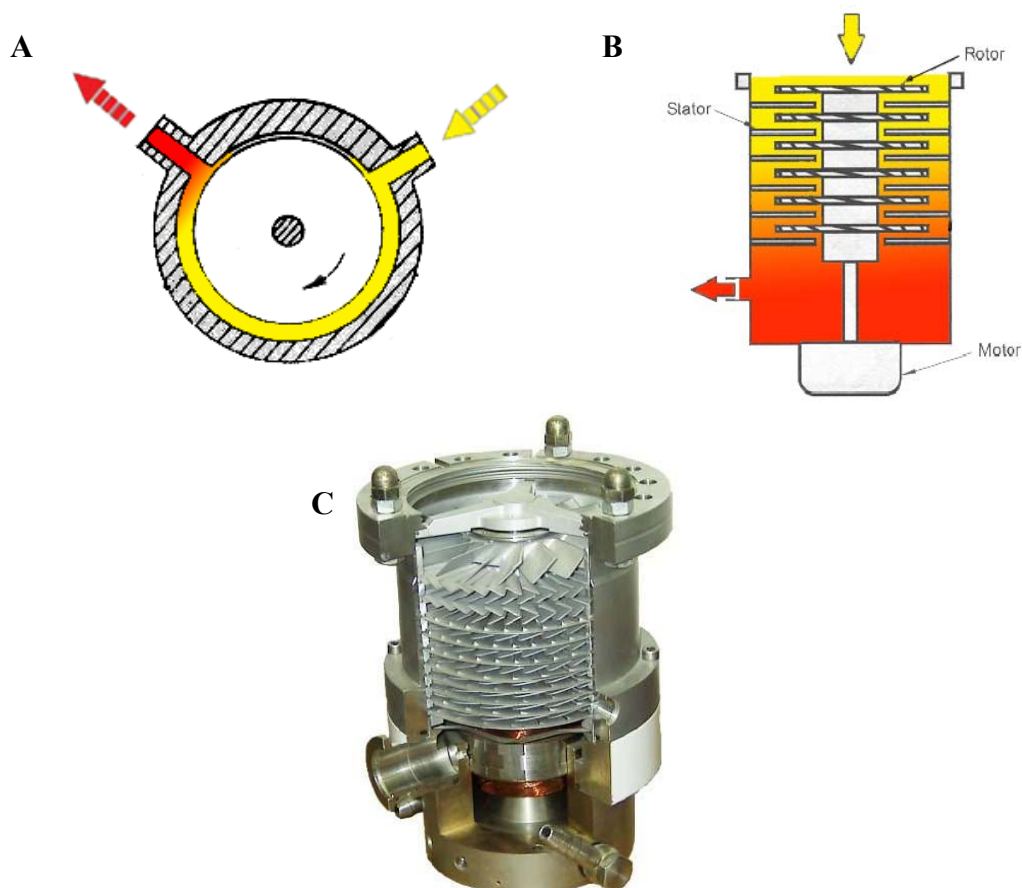


Obrázek 5. A: Schéma difúzní vývěvy, **B:** skleněná difúzní vývěva chlazená vzduchem, **C:** fotografie kovové difúzní vývěvy chlazené vodou.

Molekulární (turbomolekulární) pumpa

Tato pumpa je podobná svou konstrukcí rotační olejové pumpě, ale asymetricky umístěný rotor nemá žádné planžety a molekuly zbytkové atmosféry strhává pouze nerovnostmi na svém povrchu. Otáčky této pumpy jsou velmi vysoké (16-20 tisíc otáček za minutu) a vyžadují dokonale vyvážený rotor a uložení hřídele v magnetické levitaci. Schéma této pumpy je znázorněno na obrázku 6A. Turbomolekulární pumpa pracuje na stejném principu, jen s tím rozdílem, že molekuly plynu jsou odráženy ve směru čerpání pomocí rotoru s lopatkami. Tento typ vývěvy je velmi náročný na výrobu a tudíž drahý, ale dokáže

čerpat od velmi nízkého vakua až do tlaku 10^{-11} Pa (turbomolekulární pumpa), vakuum je velmi čisté. Molekulární vývěva nemůže pracovat při atmosférickém tlaku, protože lopatky rotoru by se silným třením o čerpaný plyn zahřály a zničily, proto je používána v kombinaci s primární vývěvou (např. olejová rotační). Pumpa se přesto velice rozšířila a je dnes součástí celé řady spektroskopických zařízení, elektronových mikroskopů a urychlovačů částic (např. Large Hadron Collider v CERNu) v průmyslu se využívá spíše výjimečně k evakuování velkých obrazovek a rentgenových lamp.

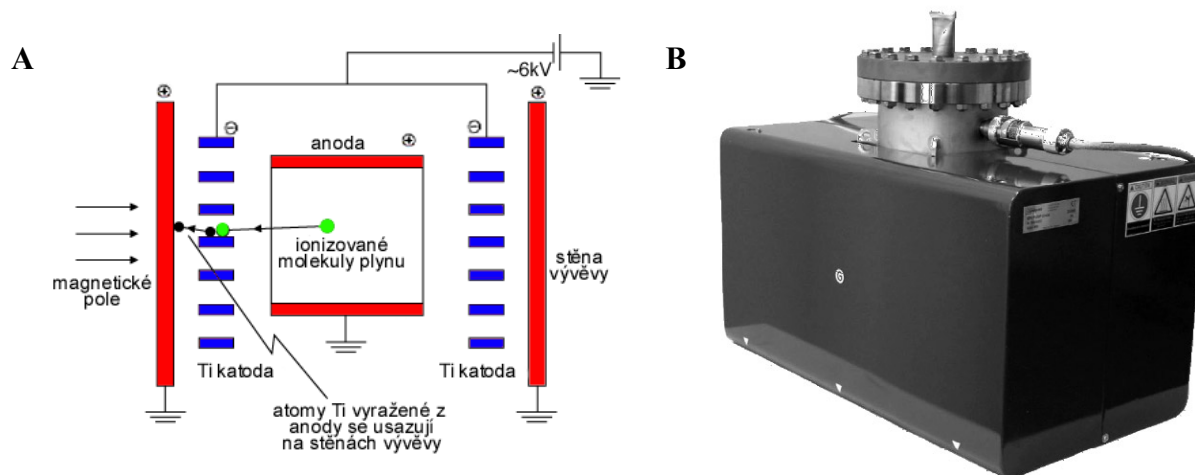


Obrázek 6. A: Schéma molekulární vývěvy, **B:** schéma turbomolekulární vývěvy, **C:** řez turbomolekulární vývěvou.

Iontová vývěva

Iontové vývěvy v sobě spojují princip hybnostních vývěv (molekulám plynu je udílen impuls ve směru čerpání proudem nabitých částic) s principem vývěv adsorpčních (molekuly plynu jsou poutány ve vývěvě). Na schématu 7A je znázorněna funkce iontové vývěvy tvořené dvěma katodami a trubicovou anodou. Na anodu se vloží napětí několik kV, takže vznikne výboj, který rozprašuje materiál elektrod na okolní stěny. Výboj probíhá v magnetickém poli permanentního magnetu, které je kolmé k rovině elektrod a proto se elektrony pohybují na dlouhých šroubovicových drahách, což zvyšuje pravděpodobnost jejich srážky s molekulami čerpaného plynu. Ten je při srážce ionizován a vzniklé ionty jsou strhávány směrem ke katodám kde se adsorbují na povrchu titanu. Účinnost vývěvy je dále zvyšována tím, že titan je rozprašován a zachycuje se na ostatních částech vývěvy, kde na sebe váže zbytky čerpaných plynů. Iontová pumpa pracuje v cyklech. Lze dosáhnout tlaku 10^{-9} až 10^{-10} Pa. Nevýhodou je vysoká cena, vysoký elektrický příkon, velká hmotnost, nižší

čerpací rychlost a nutnost obnovování elektrod. Vyšší čerpací rychlosti lze dosáhnout zvýšením plochy elektrod, vyšším napětím či použitím dalších pomocných elektrod. Tyto vývěvy se používají pro získání ultravysokého vakua ve speciálních přístrojích, jako například v hmotnostních spektrometrech, urychlovačích, mikrovlnných generátorech či elektronových mikroskopech.

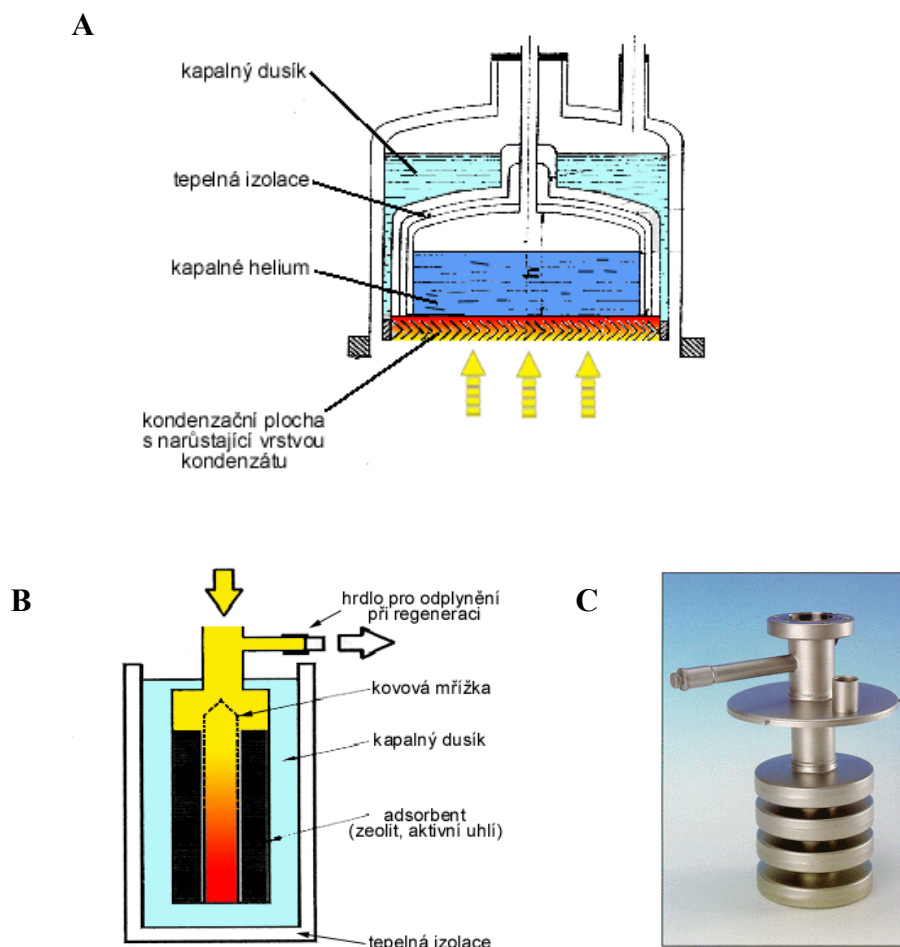


Obrázek 7. A: Schéma iontové vývěvy, **B:** fotografie iontové vývěvy.

2.4 Vývěvy adsorpční

Kryokondenzační a kryosorpční vývěvy

Kryokondenzační vývěva je obvykle tvořena dvěma izolovanými nádobami obsahujícími kapalný dusík a kapalné helium. Vnější nádoba se plní kapalným dusíkem a tepelně izoluje vnitřní nádobu s drahým kapalným heliem, která je spojena s kondenzační plochou, zasahující přímo do evakuovaného prostoru. Na této chladné ploše kondenzují molekuly zbytkového plynu a tlak ve vývěvě klesá. Protože na kondenzační ploše narůstá vrstva tuhého kondenzátu, který má špatnou tepelnou vodivost, účinnost vývěvy se během čerpacího cyklu postupně snižuje. Po skončení se vývěva musí odstavit, ohřát a kondenzační plocha se desorbuje. Pro zvýšení účinku se namísto hladké kondenzační plochy chladí materiál schopný absorbovat plyn ve svých dutinách (zeolity nebo aktivní uhlí), což je principem vývěvy kryosorpční. Tyto vývěvy jsou konstrukčně velmi jednoduché, mají velkou čerpací rychlost, poskytují čisté vakuum a lze s nimi dosahovat tlaků 10^{-7} Pa (vývěvy chlazené pouze kapalným dusíkem) i tlaků nižších než 10^{-10} Pa (vývěvy s průtokem kapalného helia).



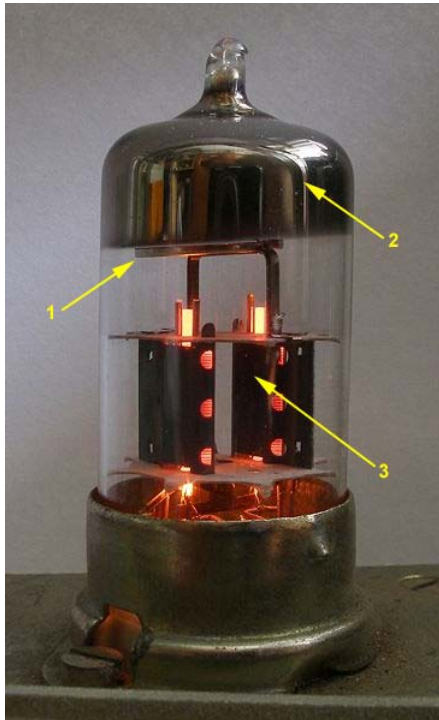
Obrázek 8. **A:** Schéma kryokondenzační vývěvy CERN, **B:** schéma kryosorpční vývěvy, **C:** fotografie zeolitové kryosorpční vývěvy.

Getrová vývěva

Getr (z angl. getter) je látka, která se přidává do vakuových zařízení, zejména elektronek a osvětlovacích trubice, pro svoji schopnost reagovat se zbytky plynu, jež nebyly zcela odsáty vývěvou. Zlepšuje tak vakuum nebo čistotu plynu v evakuovaném prostoru. Indukčním ohřevem se ve vakuu odpaří getrovací látka, obvykle baryum a pohltí v okamžiku odpaření zbytky plynů, které nestačila odsát vývěva. Getrové páry jsou v činnosti jen po několik vteřin a pak se srážejí na baňce v tuhém skupenství jako známé getrové zrcátko, jejich účinek je však mimořádně významný a důležitý. Pro rozměrná skleněná zařízení (např. obrazovky) se používají i jiné getrovací látky jako je například hliník, hořčík, vápník, sodík, stroncium, cesium nebo fosfor. V případě, že dojde k poškození trubice, getrové zrcátko rychle reaguje se vzduchem za vzniku bílých oxidů. Tak je možné snadno rozpoznat nefunkční elektronku od elektronky neporušené.

V zařízeních, která musí být zavzdušněna a poté opět evakuována (např. kvůli údržbě), se jako getr používají velmi tenké destičky slitiny zirkonia (cca 70%) s dalšími kovy (V, Fe, Co, Al nebo lanthanoidy). Při kontaktu se vzduchem tato slitina na povrchu vytvoří vrstvu oxidu, která ji pasivuje. Při zahřátí se vrstva rozruší a opět se obnaží aktivní getrovací materiál.

A



B



Obrázek 9. A: Dvojitá trioda v provozu: 1...kroužek s getrovací látkou (Ba), 2...getrové zrcátko, 3...vlastní elektronka. **B:** Ukázka pentody EF 183 (vlevo dobrá, vpravo špatná – do baňky vnikl vzduch)

3. Měření nízkých tlaků

Zařízení pro měření nízkých tlaků mohou být podle principu rozděleny do čtyřech skupin:

1. tlakové standardy (definují tlak na základě fundamentálních veličin),
2. tlakové převodníky (využívají změny tlaku k mechanické deformaci měřicího prvku),
3. vakuometry založené na měření vlastností plynu (tepelná vodivost, viskozita aj.),
4. ionizační vakuometry (měří elektrický proud procházející evakuovaným prostorem).

3.1 Tlakové standardy

Tlakové standardy jsou základem veškerého měření tlaku. Slouží k definování tlaků v rozmezích od vysokého vakua do velmi vysokých tlaků. Jsou používány primárně pro kalibrace jiných tlakových zařízení (zejména tlakových převodníků), ale i pro přímá měření tlaku.

Tlakové váhy

Tlakové váhy jsou nejuniverzálnějším a nejrozšířenějším tlakovým standardem. Definují tlaky v rozmezí od 1 kPa do 250 MPa s kalibrační nejistotou od 0,005% do 0,055% z měřené hodnoty. Tlakové váhy tvoří přesně vysoustružený píst o známém průřezu vložený do přesného válce. Na jeden konec pístu se nakládají přesná závaží jejichž tíha je vyvážena silou, kterou působí na opačný konec pístu stlačená hydraulická kapalina. V okamžiku, kdy píst volně plave, je v rovnováze s tlakem, který je dán vztahem:

$$p = \frac{gm}{A}$$

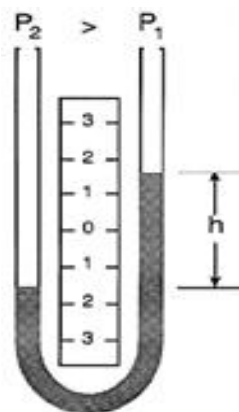
kde g je gravitační zrychlení, m je hmotnost závaží a pístu, A je plocha pístu (uvedená výrobcem). Pro přesná (kalibrační) měření je nutno ještě provést korekci na nadlehčování vzduchem (Archimedův zákon), korekci na lokální gravitační zrychlení (závisí na zeměpisné poloze a nadmořské výšce) a na tepelnou roztažnost pístu. Tlakové medium v tlakových vahách je většinou hydraulický olej, ale může být použit i plyn, třeba vzduch nebo helium stlačované vhodným kompresorem.



Obrázek 10. Fotografie tlakových vah

U-manometr

Manometr je tlakovým standardem pro tlaky v rozsahu od 1 kPa do 0.7 MPa s kalibrační nejistotou kolem 0.02% až 0.2% z čtené hodnoty. Tvoří jej průhledná (obvykle skleněná) U-trubice částečně naplněná manometrickou kapalinou. Nejčastěji používané manometrické kapaliny jsou rtuť, voda či olej.



Obrázek 11. Schéma U-manometru

Manometr měří rozdíl tlaků mezi dvěma místy. V ustáleném stavu je rozdíl mezi referenčním (nebo známým) tlakem p_1 a neznámým (měřeným) tlakem p_2 dán vztahem

$$\Delta p = p_2 - p_1 = \rho g h$$

kde ρ je hustota manometrické kapaliny při teplotě měření, g je lokální gravitační zrychlení a

h je výškový rozdíl menisků v obou ramenech manometru. Pro tlaky nižší než tlak atmosférický se často používá zkrácený rtuťový U-manometr. Rozdíl hladin v ramenech tohoto manometru nám přímo udává tlak vakua v připojeném systému jednotkách torr (mm Hg sloupce). Pro velmi přesná měření jsou k dispozici mikromanometry s laserovým odečtem hladiny rtuti a ty jsou schopny měřit změny tlaků 0,05 Pa.

McLeodův kompresní manometr

Je založen na Boylově zákonu a slouží jako tlakový (vakuový) standard pro rozsahy od 10^{-4} Pa do 10^3 Pa s kalibrační nejistotou 0,5% pro tlaky vyšší než 10^{-1} Pa a kolem 3% při tlacích nižších než 10^{-2} Pa. V tomto manometru je nad rtuťovým uzávěrem uzavřeno známé množství plynu, který je stlačován (expandován) hydrostatickým tlakem rtuťového sloupce a tlakem v měřeném prostoru.

3.2 Tlakové převodníky

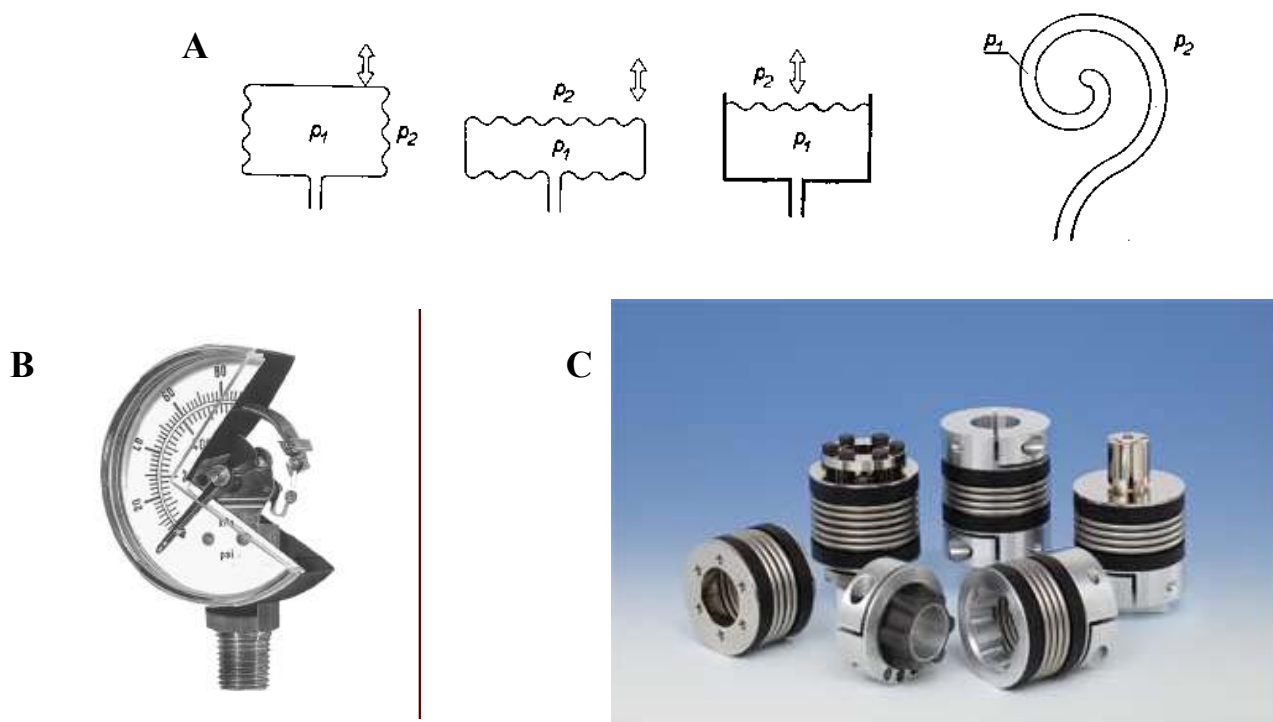
Obecně je převodník takové zařízení, které je aktivováno energií z jednoho systému a dodává (převádí) energii do jiného. Základní částí tlakových převodníků je elastický element, který převádí tlakovou energii na výchylku měřicího zařízení. Nejrozšířenější jsou tlakové převodníky mechanické a elektrické.

V *mechanických tlakových převodnících* je vstupní tlaková energie převedena na výstupní energii mechanickou. Příkladem mechanického tlakového převodníku jsou různé varianty U-manometru, Bourdonova trubice, vlnovec, membránový tlakoměr a další.

V *elektrickém tlakovém převodníku* mění elastický prvek některé své elektrické vlastnosti (elektrický odpor, kapacita, ...). Aktivní převodník generuje svůj vlastní elektrický výstup, zatímco pasivní převodník vyžaduje pomocný elektrický signál, který je určitým způsobem modulován. Příkladem elektrického tlakového převodníku je kapacitor, piezokrystal či odporový tenzometr.

Membránové manometry

Tyto manometry využívají pružných vlastností membrán (které se prohnu v závislosti na rozdílu tlaku vně a uvnitř prostoru, který rozdělují). Membrána může mít i tvar trubice s vlnitým povrchem, tzv. vlnovec, jejíž délka se mění v závislosti na rozdílu tlaků uvnitř a vně trubice. Lze jimi měřit tlaky asi do 10^{-2} Pa.

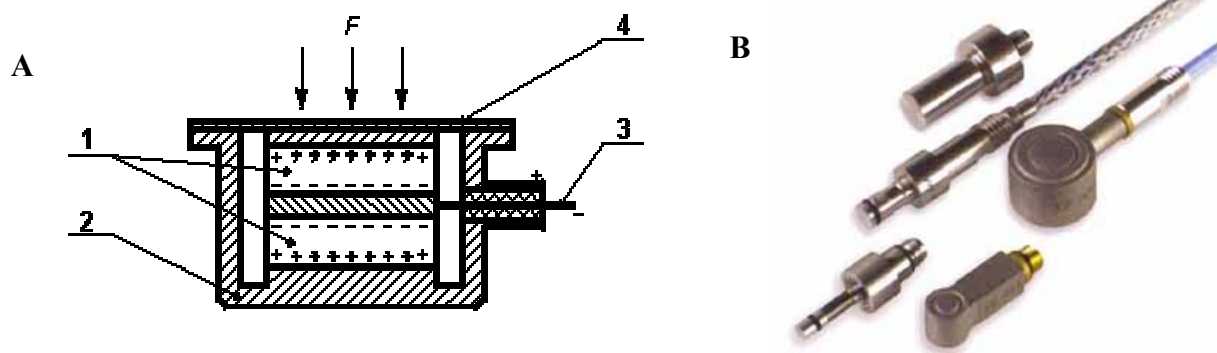


Obrázek 12. A: Různé tvary nádob membránových manometrů (měch, krabice, pevná nádobka s membránou, nádobka spirálního tvaru. **B:** Manometr s Bourdonskou trubicí, **C:** různé typy vlnovců.

Piezoelektrické tenzometry

Piezoelektrický krystal je hlavní součástí aktivních elektrických tlakových převodníků. Krystaly postrádající střed symetrie mohou produkovat povrchový potenciál, jsou-li vystaveny deformaci v určitém směru. Křemen (SiO_2), Seignettova sůl ($\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), titaničitan barnatý (BaTiO_3) a další (PbZrO_3 , LiNbO_3 , LiTaO_3 ...) jsou nejběžnější krystaly, které vykazují piezoelektrický jev. Samotný snímač je vytvořen z krystalového výbrusu, který je opatřen vodivými elektrodami. Při působení tlaku se piezoelektrický snímač chová jako generátor náboje. Výstupní napětí snímače je poměrně vysoké, přesto není možné k měření použít přímo ukazovacího měřicího přístroje. Mezi měřicí přístroj a snímač je nutno zařadit zesilovač s velkým vstupním odporem, jehož hlavním úkolem je impedanční přizpůsobení, méně již vlastní zesílení signálu. Běžně se využívá obvodů realizovaných s tranzistory řízenými elektrickým polem. Piezoelektrické převodníky jsou používány pro měření velmi rychle se měnících tlaků.

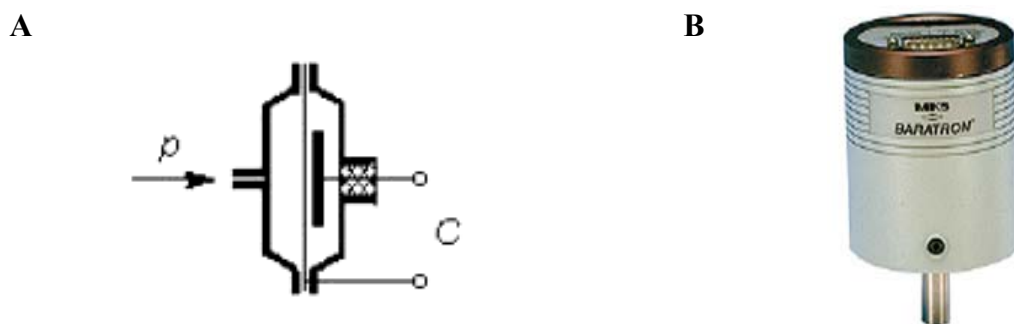
Piezoelektrického jevu je možno využít i tak, že vytvoříme rezonátor z křemenného krystalu, který má jedinečnou frekvenci. Tato frekvence se však může změnit při působení tlaku na rezonující krystal. Ve spojení s referenčním rezonátorem (pro kompenzaci kolísání okolní teploty) tvoří velmi přesný tlakoměr. Používá se pro měření vysokých tlaků (do 70 MPa), ale může být i upraven pro měření vakua. Pro svou přesnost je používán jako sekundární standard. Nevýhodou je vysoká cena kompletního zařízení.



Obrázek 13. A: Schéma piezoelektrického tenzometru (1...piezoelektrický krystal, 2...kovové stínění prvku, 3...výstupní kabel, 4...pružná membrána, F...působící tlaková síla). B: Různá provedení piezoelektrických tenzometrů.

Kapacitní snímače tlaku (kapacitory)

Základem kapacitního snímače je dvou nebo několika elektrodový systém, jehož parametry se mění v důsledku působení měřené neelektrické veličiny. Pro měření tlaku se využívá kapacitního snímače, u něhož dochází ke změně vzdálenosti mezi elektrodami. Jedna elektroda kondenzátoru je pevná a druhá je tvořena membránou, která vlivem působení měřeného tlaku mění svou polohu, vzdálenost těchto elektrod pak určuje kapacitu kondenzátoru. Kapacita měřicího prvku je dále elektronicky zpracována a převedena na hodnotu tlaku. Běžně se používají se pro měření tlaků v rozmezí $10^6 - 10^{-1}$ Pa s přesností 0,08 – 0,25 %, existují však i kapacitory pro měření tlaků až do 10^{-3} Pa..



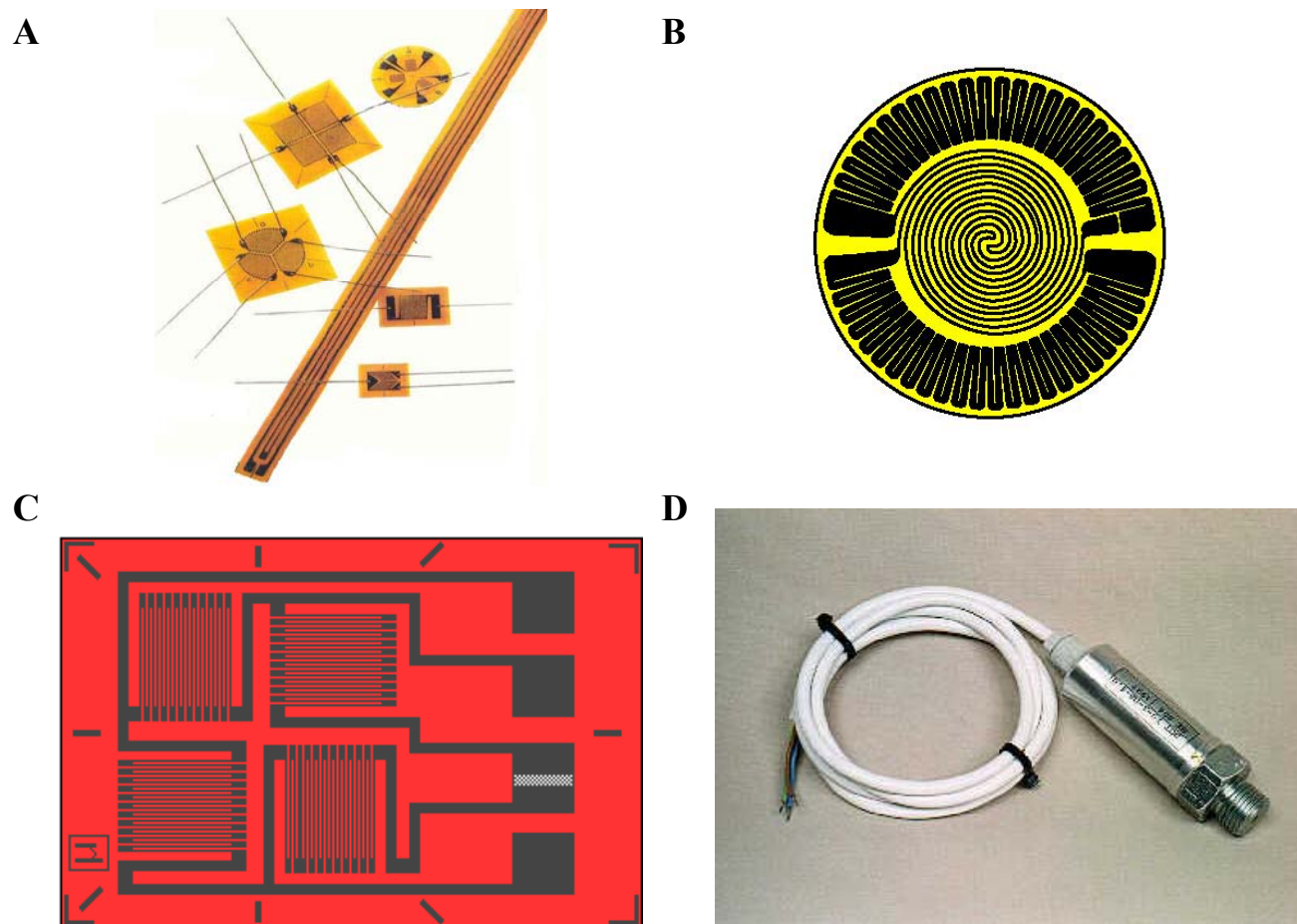
Obrázek 14. A: Schéma kapacitního snímače tlaku, B: fotografie vakuového kapacitoru.

Snímače s odporovými tenzometry

Tenzometrické snímače (někdy též nazývané snímače s proměnlivým odporem) jsou nejčastěji používanými elektrickými tlakovými převodníky. Odporový tenzometr je senzor, u něhož se využívá tzv. *piezorezistivního jevu*. Při mechanickém namáhání v oblasti pružných deformací dochází u kovových vodičů nebo polovodičů ke změnám v krystalové mřížce, které vedou ke změně odporu. Podobně jako piezoelektrické převodníky jsou tato zařízení používána zejména pro měření rychle se měnících tlaků.

Kovové odporové tenzometry se vyrábějí z odporových drátků průměru 0,02 až 0,05 mm, které jsou nalepeny na tenký podklad z papíru nebo z plastické hmoty. Mají tvar mnohonásobné vlásenky. Konce drátku jsou připájeny na tlustší vývody. Celý tenzometrický snímač se na měřenou součást přilepí speciálním lepidlem. Tenzometrické snímače složitých tvarů (radiální, spirálové aj.) se dnes vyrábějí odleptáváním tenké odporové fólie (shodný postup jako výroba plošných spojů).

Polovodičové tenzometry se vyrábějí se z křemíku, a to buď řezáním, broušením či leptáním monokrystalu nebo planární technologií na křemíkovém nebo jiném substrátu. Působením mechanického namáhání v určité krystalografické ose monokrystalu polovodiče nebo v difúzní vrstvě polovodiče dochází ke změně elektrické vodivosti. Změna odporu závisí na typu polovodiče i na koncentraci příměsí. Aktivní část, proužek z polovodiče, se lepí vhodným lepidlem na plochu podléhající deformaci.

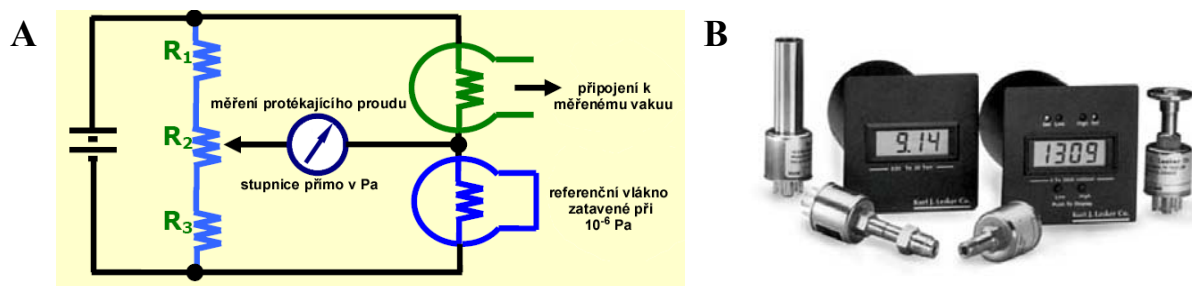


Obrázek 15. A-C: Různé typy odporových mikrotenzometrů, D: fotografie polovodičového tlakoměru.

3.3 Vakuometry založené na měření vlastností zředěného plynu

Tepelně vodivostní vakuometry

Tyto vakuové měrky známé též jako *Pirani vakuometry* jsou založeny na principu odvodu tepla z vodiče ohříváného konstantním proudem. Skládají se ze dvou ploch o různé teplotě mezi nimiž je teplo přenášeno přítomnými molekulami plynu. Přenos tepla závisí na hustotě plynu a tudíž i na jeho tlaku. Tyto vakuometry umožňují měření tlaků od 10^{-1} Pa do 10^5 Pa (přesnost roste s klesajícím tlakem). Někdy je potřeba provést korekci na rozdílnost tepelné vodivosti u různých plynů. Tyto měrky se mohou lišit provedením a způsobem jakým je indikována změna teploty v čidle. Termočláňková čidla obsahují zahříváné vlákno a termočláňek, kterým je měřena teplota vlákna jakožto funkce tlaku. Termistorové měrky využívají k měření teploty vlákna polovodičové materiály namísto termočláňku. Pirani měrky jsou velmi rozšířené a relativně levné.



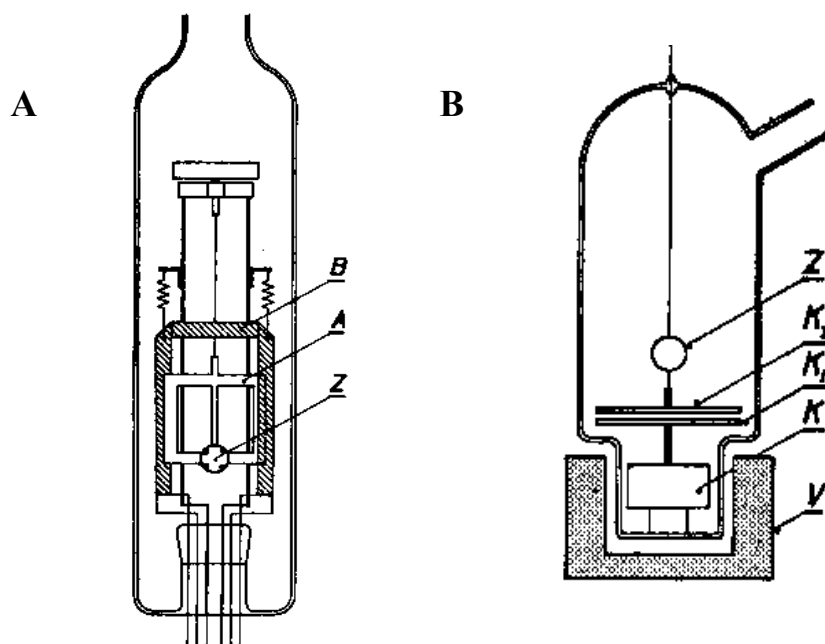
Obrázek 16. A: Schéma měrky Pirani, **B:** fotografie různých provedení Pirani vakuometrů.

Molekulární manometr (Knudsenův)

Principem molekulárního manometru je destička zavěšená na křemenném vlákně se zrcátkem (viz obrázek 17A). Volná destička A je umístěna mezi dvěma elektrickým proudem vyhřívánými pevnými destičkami B tak, že se tepelný účinek na destičku A sčítá. Vyšší tlak plynu znamená vyšší koncentraci molekul, které narážejí na destičku A a způsobují tak její vychýlení. Rozsah měřeného tlaku je $10^2 - 10^{-3}$ Pa.

Langmuirův – Dushmanův manometr

Využívá přenos impulsu zředěným plynem. Dolní kotouček rotuje a molekuly mezi oběma kotoučky přenášejí impuls na horní kotouček. Úhel natočení zrcátka je zde funkcí viskozity plynu v evakuovaném prostoru: vyšší tlak znamená vyšší viskozitu plynu a impuls se snadněji přenáší na horní kotouček. Tlak se určuje z úhlu natočení zrcátka. Měřící rozsah je $1 - 10^{-6}$ Pa.

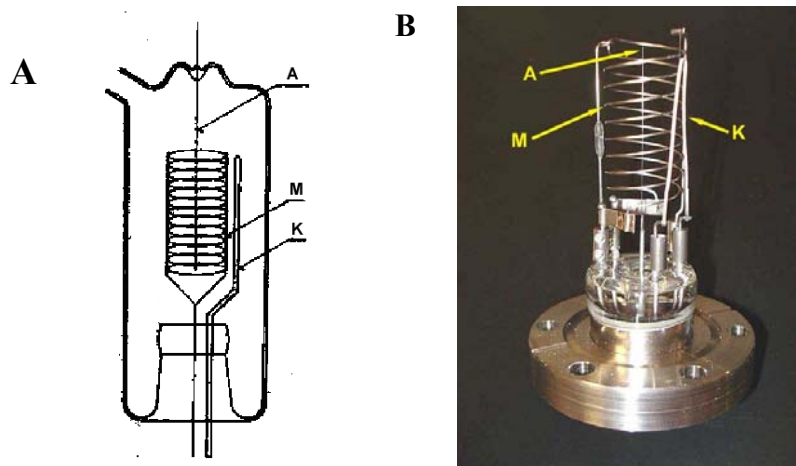


Obrázek 17. A: Molekulární manometr (A – volná destička se zrcátkem Z, B – vyhřívané destičky). **B:** Langmuirův – Dushmanův manometr (K_z – zavěšený kotouč se zrcátkem Z, K_r – rotující kotouček spojený s osou kotvy K motoru, V – vinutí motoru).

Ionizační vakuometry

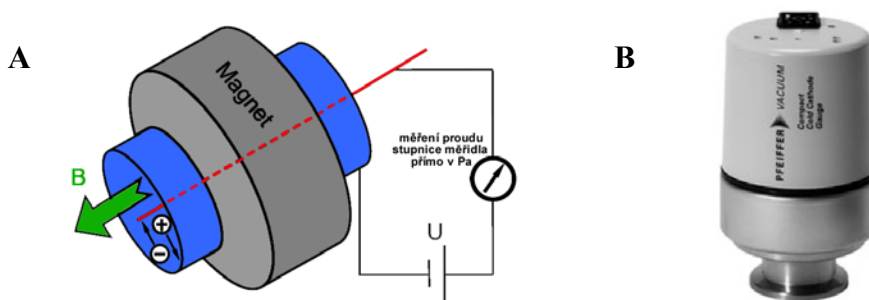
Principem ionizačního vakuometru je měření elektrického proudu mezi elektrodami, které jsou umístěny ve vakuu. Průchod elektrického proudu mezi elektrodami je realizován pohybem elektricky nabitých částic. Vznik iontů ve vakuometru je způsoben srážkami molekul plynu s proudem elektronů (ionizační vakuometry se žhavenou či studenou katodou) nebo účinkem α -záření z rozpadu radioaktivního materiálu (v tzv. alfatronech).

Ionizační vakuometr se žhavenou katodou (např. Bayardův-Alpertův) se skládá z vlákna katody žhavené elektrickým proudem, z anody a z měřicí elektrody – kolektoru. Konstrukčně je to v zásadě elektronka (trioda), která byla hojně používána v elektronice před vynálezem tranzistoru. Žhavená katoda funguje jako zdroj elektronů, které ionizují zbytkový plyn. Množství vzniklých iontů je úměrné hustotě plynu a tedy i jeho tlaku. Napětí anoda – katoda je cca 200 V. Tlak plynu se určuje z proudu na kolektoru, kde dochází k nárazům molekul ionizovaného plynu. Používá se pro měření tlaků $10^{-1} - 10^{-6}$ Pa (po speciálních úpravách až 10^{-9} Pa). Během měření nesmí do aparatury vniknout vzduch, protože žhavé katodové vlákno by ihned shořelo. I při dodržení této zásady dochází k postupnému odpařování materiálu vlákna a vakuová měrka musí být po čase nahrazena novou.

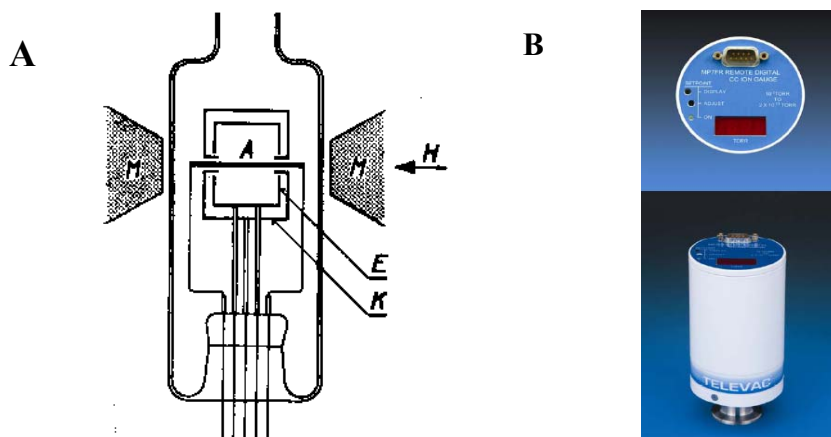


Obrázek 18. A: Schéma ionizačního vakuometru se žhavenou katodou, **B:** skutečné provedení vakuometru typu Bayard-Alpert (A...anoda, K...žhavené vlákno katody, M...měřicí elektroda – kolektor).

Ionizační vakuometr se studenou katodou (např. Penning či inverzní magnetron) využívá jako zdroje elektronů výboj ve elektrickém poli vytvořeném stejnosměrným napětím cca 4 kV. Pro zvýšení pravděpodobnosti srážek elektronů s velmi zředěnými molekulami plynu jsou elektrody umístěny do silného magnetického pole, které nutí elektrony kroužit po spirálních drahách. V běžné Penning měrce (válec o průměru cca 2 cm a délce 10 cm) činí dráha elektronu i několik desítek metrů. Na dráhu vzniklých iontů vzhledem k jejich relativně velké hmotnosti nemá magnetické pole téměř vliv, tyto ionty dopadají na anodu a vytvářejí tak měřitelný proud. Vakuometr Penning je vhodný pro měření tlaků $10^{-1} - 10^{-7}$ Pa, inverzní magnetron až do vakua 10^{-11} Pa. Rozdíl v konstrukci měrky Penning a inverzního magnetronu je především ve vzájemném uspořádání elektrod. Inverzní magnetron navíc obsahuje stínící elektrodu, která má za úkol zabránit vyražení fotoelektronů z katody (měkkým RTG zářením které vzniká při výboji) a tím výrazně zvyšuje citlivost měrky. Vniknutí vzduchu do měrky během měření nemá na ni destruktivní vliv jako je tomu v případě ionizačních vakuometrů se žhavenou katodou a její funkčnost se s časem prakticky nemění.

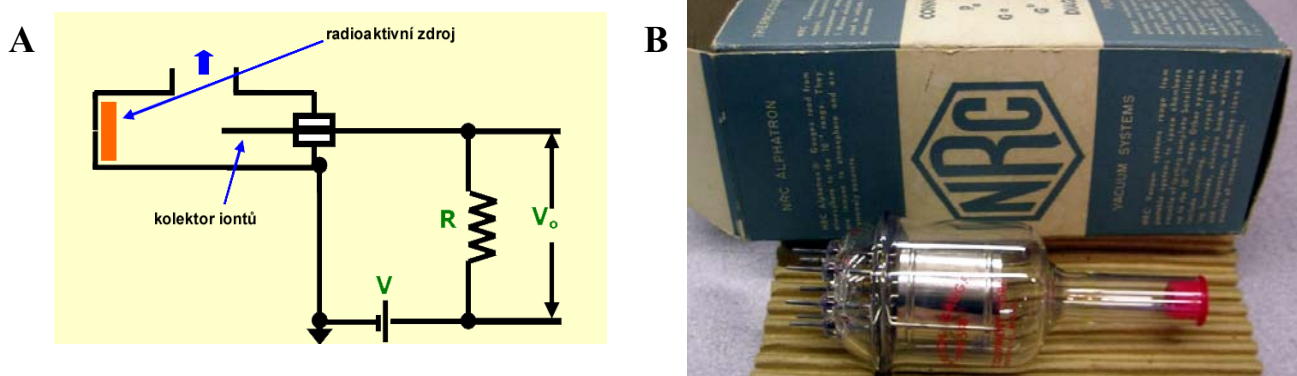


Obrázek 17. A: Schéma Penningova vakuometru, **B:** fotografie měrky typu Penning.



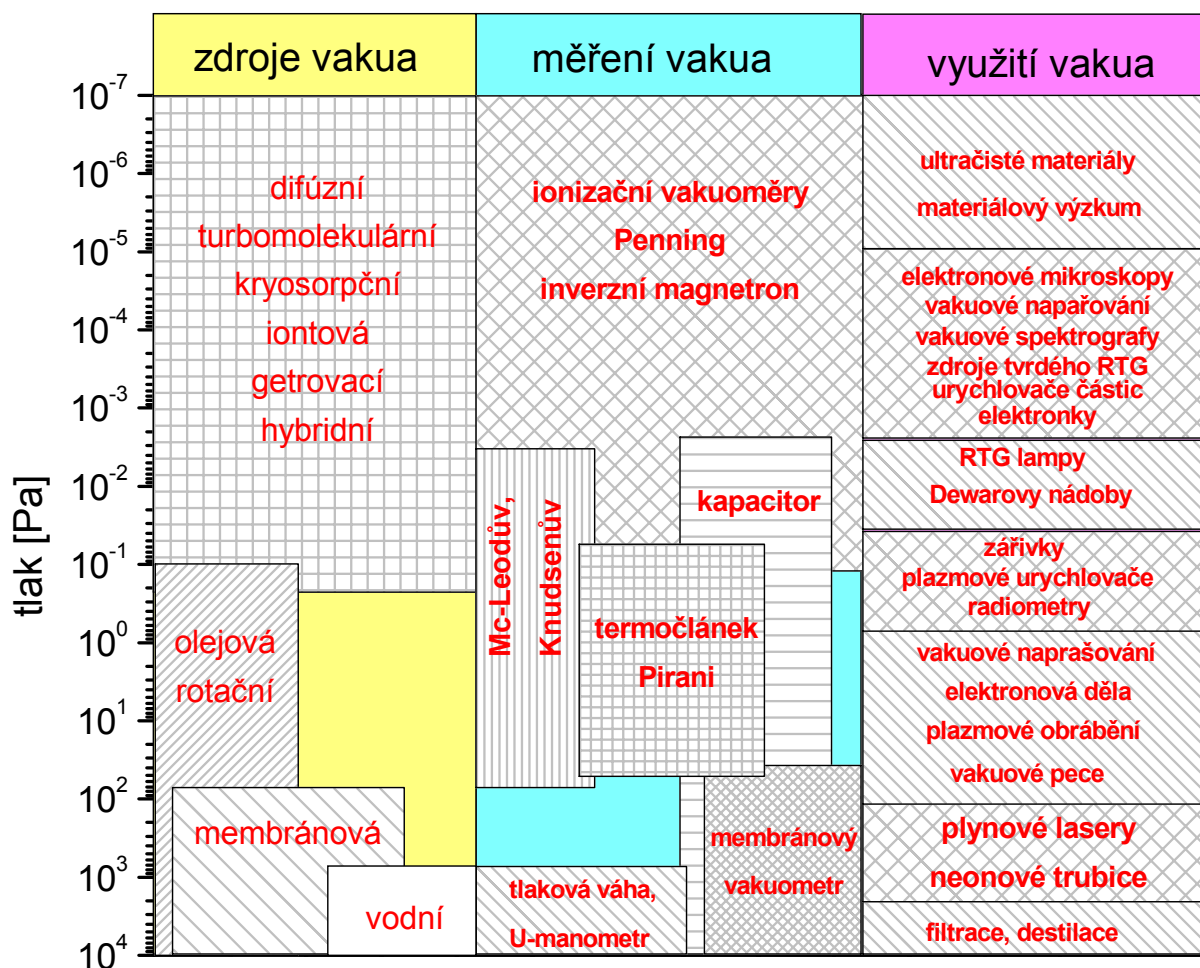
Obrázek 18. A: Schéma inverzního (Redheadova) magnetronu (A...tyčinková anoda, K...plošná katoda, E...stínící elektroda, M...magnet), **B:** fotografie inverzního magnetronu pro měření tlaků $1 - 10^{-9}$ Pa.

Alfatron je tvořen dvojicí elektrod, na něž je přiloženo stejnosměrné napětí cca 100V a malým množstvím radioaktivního materiálu s dlouhým poločasem rozpadu, které je zdrojem α -částic (např. Ra). Proudem α -částic jsou ionizovány molekuly zbytkových plynů, které putují ke katodě a přenášejí tak elektrický proud. Změna proudu je přímo úměrná měřenému tlaku v oblastech $10^{-1} - 10^5$ Pa, alfatron je možné používat i pro měření tlaků až do 10^{-3} Pa, avšak v dnešní době se již nepoužívá a byl nahrazen ionizačními vakuometry se žhavenou katodou.



Obrázek 20. A: Schéma alfatronu (pokles napětí V_0 je přímo úměrný změně tlaku v alfatronu), **B:** fotografie alfatronové měřky vakua.

4. Využití vakuové techniky v technologii a průmyslu



Obrázek 22. Zdroje, měření a využití vakua podle tlaku.

Vakuová technika pronikla téměř do všech odvětví lidské činnosti a denně se můžeme potkávat s výrobky a zařízeními, která jsou nějakým způsobem spojena s využitím vakua. Na závěr tohoto učebního textu jsou uvedena jednotlivá průmyslová odvětví s příklady procesů využívajících vakuum (viz str. 27). Tlak, za jakého je uvedený proces realizován, je možné odhadnout z diagramu na obrázku 22. Výběr zdroje vakua vhodného pro technologickou operaci se řídí několika kritérii:

1. mezní tlak vývěvy
2. cena
3. množství plynů odsávaných do vývěvy, tj. čerpací rychlost
4. vlastnosti plynů jež jsou vývěvou odsávány (korozivní plyny apod.)

Tak například pro vakuové napařování a napařování těkavých kovů (např. Al, Ba) postačuje dvoustupňová rotační vývěva, pro stejnou operaci s méně těkavými kovy (např. Ti) je nutné použít vývěvu difúzní či hybridní.

V automatizovaných linkách se v současné době hojně využívají podtlakové přísavky pro uchopení a manipulaci s různými předměty jako jsou plechy, skleněné tabule ale i betonové dílce, plastové výrobky a další. Vakuová přísavka má relativně malý objem, ale je

třeba v ní vytvořit dostatečný podtlak, aby se předmět neuvolnil během manipulace. Zde se nejvíce používají rotační olejové vývěvy, které vytvoří dostatečný podtlak a nejsou příliš náchylné na případně znečištění prachovými částicemi.

V živočišné výrobě se vývěvy používají například v automatizovaných dojících linkách skotu. Zde je třeba použít vývěvu s dostatečnou čerpací rychlostí, avšak tlak v dojících přísavkách nesmí být příliš velký, aby nedošlo k poranění zvířete. Dříve byly používány vodní vývěvy, avšak vzhledem k velké spotřebě vody jsou z ekonomických důvodů nahrazovány membránovými a Rootsovými vývěvami v kombinaci s regulátory vakua.

Přehled využití vakua v technologických procesech

Průmyslové odvětví	Obor	Aplikace	Technologický postup
Elektronika	součástky	elektronky, obrazovky	evakuace, getrování, kontrola těsnosti, zátavy
		integrované obvody	vakuové napařování a naprašování kovových i nekovových vrstev
		kondenzátory	vakuové napařování a naprašování kovu na papír a plastické fólie
		tranzistory, LED	vakuová výroba polovodičových vrstev (dopování, napařování)
		rezistory	vakuové napařování a naprašování odporových vrstev
	oscilační krystaly	vakuové napařování a naprašování kovových vrstev	
	datová média	CD, CD-ROM, DVD	vakuové napařování kovových vrstev na plasty
Elektrotechnika	světelné zdroje	žárovky, výbojky zářivky	evakuace, getrování, vakuové plnění, odplyňování, pokovování, kontrola těsnosti, zátavy
	vinutí	transformátory, motory, tlumivky	lakování vinutí za horka ve vakuu
Hutnictví	vakuová metalurgie	speciální materiály	vakuové tavení, slinování, pájení, žíhání, kalení, sváření, odlévání, rafinace kovů
Optika	přístroje	čochy, hranoly, filtry, zrcadla	vakuové pokovování
	spotřební keramika, sklo, bižuterie	dekorativní povrchové vrstvy	vakuové napařování a naprašování kovových i nekovových vrstev
Chemie	vakuové čištění	monokrystaly, vysoce čisté látky	sublimace, zonální tavba, destilace
	plasty	vrstvy polymerů	polymerace monomerů ve vakuu
		lisování plastů	lití a lisování plastů ve vakuu
Potravinářství	potraviny	masné, mléčné výrobky	vakuová sterilace, konzervace, balení
Zemědělství	produkty	obilí, semena	evakuace, balení, sušení
	živočišná výroba	dojení, ošetřování skotu	automatizované vakuové dojící systémy, ošetřování skotu (vakuové myčky struků)
Ostatní		plnění porézních materiálů	Vakuové plnění porézních materiálů například olejem (kluzná ložiska)
		porézní materiály nasáté vodou	vakuové a sublimační sušení
		automatizované montážní linky	uchopovací podtlakové přísavky

Použitá literatura

1. Cibulka I., Hnědkovský L., Hynek V.: *Základní fyzikálně-chemické veličiny a jejich měření*, UFCH VŠCHT Praha, 2006.
2. Heraeus W.C.: *60 Jahre Quarzglas – 25 Jahre Hochvakuumtechnik*, Hanau, 1961.
3. Eschbach H.-L.: *Praktikum der Hochvakuum-technik*, Leipzig, 1962.
4. Technické specifikace výrobků firmy Vakuum Praha: <http://www.vakuum.cz/>.
5. Technické specifikace výrobků firmy Lutos a.s.: <http://www.lutos.cz/>.
6. Hulínský V.: *MSCHPL - Vakuové systémy*, učební text, <http://www.vscht.cz/sil/download/download.html>.
7. Encyklopedie Wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page
8. Ohanian, H.C.: *Physics*, W.W.Norton & Company, 1989.
9. Serway R.A.: *Physics*. Saunders Coll. Publishing, 1996.
10. Kai L.: *Vacuum Basic & Pumps*, lecture slideshow, 2008.
11. Technické specifikace výrobků Glassblowing Facility of Arizona State University Main, <http://www.public.asu.edu/~aomdw/GLASS/>.
12. Technické specifikace výrobků Wilden Pump & Engineering, LLC, <http://wildenpump.com/index.cfm>.